

М. В. ИНОЧКИН, В. В. НАЗАРОВ, К. А. ФЕДИН, Л. В. ХЛОПОНИН, В. Ю. ХРАМОВ

МОЩНЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ Nd:YAG-ЛАЗЕР С НЕУСТОЙЧИВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Рассматривается компактный источник лазерного излучения на основе кристаллов Nd:YAG с энергией импульса до 800 мДж на длине волны 1064 нм, длительностью импульса 3—5 нс, углом расходимости 0,6 мрад и квазиравномерным поперечным распределением излучения на выходе лазера. Приведен сравнительный анализ результатов предварительного компьютерного моделирования лазерного излучателя и экспериментальных данных.

Ключевые слова: импульсный лазер, неустойчивый резонатор, градиентное выходное зеркало, ближняя зона излучения.

Введение. В настоящее время лазерное излучение ближнего ИК-диапазона широко применяется в различных областях науки и техники, а также в лазерной медицине. Эффективность использования лазеров для получения наноматериалов и в косметологии обсуждается, в частности, в работах [1, 2]. Одной из важнейших характеристик лазерного излучения в случае применения его в технологических операциях является равномерность распределения поверхностной плотности энергии излучения в ближней зоне. Многие технологические операции также требуют воздействия на длинах волн основной (1064 нм) и второй (532 нм) гармоник Nd:YAG-лазера, работающего в режиме модулированной добротности.

Одной из проблем при расположении лазера в базовом блоке является „доставка“ лазерного излучения в зону обработки. Использование малогабаритного лазера, который может быть размещен вблизи зоны обработки, освобождает от необходимости применять громоздкие зеркально-линзовые и „нежные“ оптоволоконные системы доставки излучения.

В настоящей статье приведены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований моноимпульсного лазера с неустойчивым резонатором, содержащим выходное зеркало с переменным коэффициентом отражения (градиентное зеркало), а также результаты оптимизации параметров градиентного зеркала, направленной на улучшение пространственных и энергетических характеристик излучения мощного малогабаритного лазера.

Оптическая схема лазера. В ходе разработки малогабаритного лазера был произведен сравнительный анализ оптических схем лазерных резонаторов относительно достижения необходимой энергии генерируемого излучения, получения квазиравномерного поперечного распределения излучения и уменьшения габаритных размеров излучателя. Известным способом создания квазиравномерного профиля излучения на мишени является режим многомодовой генерации лазерного излучения с применением устойчивого резонатора. В этом случае значительное усиление активной среды и малая длительность импульса излучения могут привести к разрушению оптических элементов лазера. Повреждения диэлектрических покрытий

оптических элементов устойчивого резонатора могут быть обусловлены высокоинтенсивными мелкомасштабными неоднородностями поперечного распределения интенсивности лазерного излучения внутри резонатора, имеющими, в том числе, вид дифракционных колец. Такие неоднородности возникают, в первую очередь, в результате краевой дифракции лазерного излучения при высоких коэффициентах усиления активной среды.

Несомненное достоинство неустойчивых резонаторов положительной ветви заключается в отсутствии внутрирезонаторной фокусировки излучения и возможности существенного уменьшения длины резонатора без увеличения расходимости излучения [3]. Уменьшение влияния дифракции на равномерность пространственного распределения излучения достигается применением градиентного выходного зеркала. Для достижения энергии выходного импульса порядка $E_g=1$ Дж была выбрана схема построения лазера в виде системы „задающий генератор—усилитель“, включающей в себя два активных Nd:YAG-элемента диаметром 6 мм, расположенные в одном квантроне и накачиваемые одной импульсной лампой накачки. Схема лазера с неустойчивым резонатором представлена на рис. 1, где 1 — глухое зеркало, 2 — четвертьволновая пластинка, 3 — ячейка Поккельса, 4 — поляризатор, 5 — активный элемент задающего генератора, 6 — выходное зеркало с переменным коэффициентом отражения, 7 — система поворотных зеркал, 8 — активный элемент усилителя, 9 — кристалл удвоения частоты. Габаритные размеры лазера не превышают 250×50×40 мм.

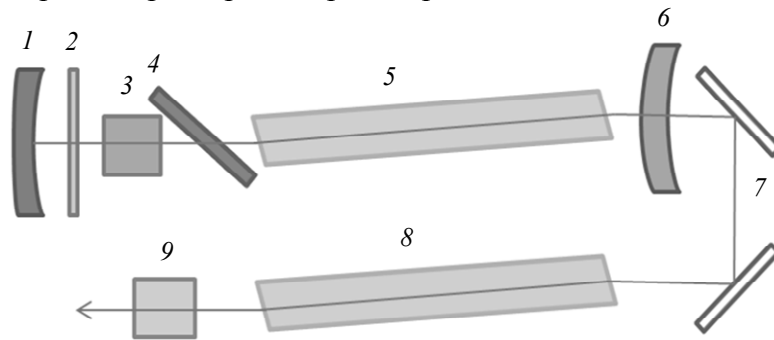


Рис. 1

Торцевые поверхности активных элементов наклонены к оптической оси лазера для предотвращения возникновения обратной волны в телескопическом резонаторе, приводящей к ухудшению пространственных характеристик излучения и повреждению оптических элементов [4]. Излучение из задающего генератора в усилитель направляется с помощью поворотных зеркал. На выходе излучателя расположен нелинейный кристалл КТР для удвоения частоты основного излучения.

Проведению теоретических исследований характеристик лазерного излучения предшествовали экспериментальные измерения коэффициента усиления и оптической силы тепловой линзы в активном элементе. Полученные значения использовались при проведении компьютерного моделирования на основе математической модели лазера, разработанной ранее [5]. Коэффициент усиления слабого сигнала за один проход составил величину, равную примерно 30, а значение оптической силы тепловой линзы равнялось $0,7 \text{ м}^{-1}/\text{кВт}$.

В ходе исследований в качестве критерия оптимизации было выбрано достижение квазиравномерного распределения плотности излучения в плоскости выходного торца активного элемента усилителя. В процессе оптимизации варьировались радиусы кривизны зеркал и профиль коэффициента отражения выходного зеркала резонатора лазера для уменьшения дифракционных явлений, возникающих при распространении излучения через естественные ограничивающие апертуры в виде входных, выходных и боковых поверхностей активных элементов. Зависимость коэффициента отражения выходного зеркала от пространственной координаты (r) моделировалась в виде супергауссовой функции:

$$R = R_{\max} \exp\left(-\frac{2r^n}{w^n}\right),$$

где R_{\max} — максимальное значение коэффициента отражения, w — поперечный размер отражающего покрытия, n — показатель степени супергауссова профиля коэффициента отражения.

В процессе оптимизации были выбраны следующие диапазоны значений параметров выходного зеркала: $n=4\dots 10$, $R_{\max}=0,15\dots 0,25$, $2w=3,0\dots 4,5$ мм, коэффициент увеличения резонатора $M=1,1\dots 1,4$. Очевидно, что при близком к полному заполнении излучением апертуры активного элемента задающего генератора возникают существенные дифракционные эффекты в системе задающий генератор—усилитель. Это приводит к увеличению неравномерности поперечного распределения интенсивности излучения, что, в свою очередь, увеличивает риск повреждения оптических элементов. При неполном заполнении активного элемента равномерность в ближней зоне улучшается, но при этом уменьшается энергия выходного излучения E_g . Оптимальные характеристики градиентного зеркала можно определить в соответствии с соотношениями [6, 7]

$$\exp\left(-\frac{2r^n}{w^n}\right) < 2 \cdot 10^{-2}, \quad R_{\max} \leq \frac{1}{M^2}.$$

В результате исследований установлено, что при значениях $R_{\max} < 0,2\dots 0,25$ не происходит существенного уменьшения неоднородности поперечного распределения в ближней зоне, при этом значение E_g уменьшается; при $R_{\max} > 0,25$ неоднородность увеличивается примерно до 25—30 %. Уменьшение показателя n до 3—4 не приводит к существенному уменьшению неоднородности в моноимпульсном режиме, а энергия E_g при этом падает. При высоких значениях n неоднородность увеличивается, а при $n > 10$ возникают дифракционные кольца. Приемлемые энергетические характеристики достигаются при $n=5\dots 7$.

Компьютерное моделирование показало, что при тепловой линзе в активном элементе $D=0,14$ м⁻¹ и базе резонатора $L=220$ мм лучшие результаты достигаются при $M=1,55$, радиусах кривизны глухого и выходного зеркал 1,1 и -0,7 м соответственно. При этих параметрах резонатора наиболее равномерное пространственное распределение выходной энергии лазерного излучения наблюдается при следующих значениях параметров выходного зеркала: $R_{\max}=0,22$, $2w=3,05$ мм, $n=6$. На выходе усилителя рассчитанное значение $E_g = 0,92$ Дж, неравномерность вершины радиального распределения выходной энергии составляет 0,06. Следует отметить, что при данных параметрах выходного зеркала сохраняется стабильность пространственных характеристик излучения в ближней зоне при изменении тепловой линзы в диапазоне 0,14—0,18 м⁻¹. На рис. 2 приведены графики радиального распределения коэффициента отражения выходного зеркала (кривая 1), а также рассчитанных радиальных распределений интенсивности I излучения лазера внутри резонатора (кривая 2), на выходе задающего генератора (кривая 3) и на выходе усилителя (кривая 4).

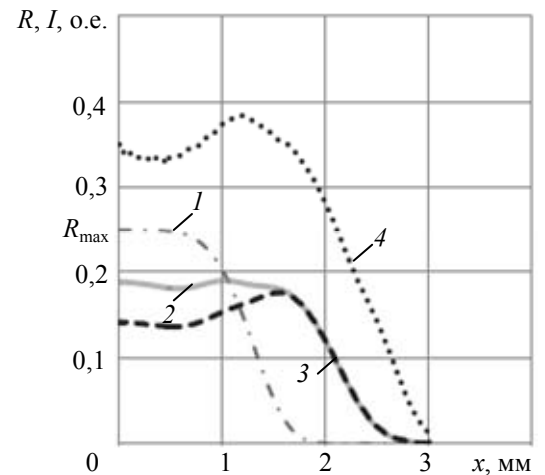


Рис. 2

Экспериментальное исследование лазера. Исследование пространственных и энергетических характеристик излучения лазера проводилось на стенде, в состав которого были включены: измеритель энергии Ophir Laserstar с пироэлектрическим датчиком PE25BF; фотодиод Thorlabs SIR5 и осциллограф LeCroy WaveRunner 62Xi для регистрации временной

структуры излучения; ПЗС-камера Ophir BeamStar FX 50 для регистрации пространственного распределения генерируемого излучения.

Конфигурация лазерного резонатора полностью соответствовала данным, полученным при моделировании. На рис. 3, а, б представлены графики поперечного профиля распределения интенсивности излучения на выходе лазера при следующих параметрах выходного зеркала: а — $2w=3,05$ мм, $n=6$, $R_{\max}=22$ %; б — $2w=4,5$ мм, $n=10$, $R_{\max}=22$ %; кривая 1 соответствует сечению вдоль оси X , кривая 2 — сечению вдоль оси Y . Как видно из данных рис. 3, а, мелкомасштабная модуляция пространственного распределения различима, но ее средняя величина не превышает 2—3 %, неравномерность пространственного распределения на вершине не превышает 6—8 %, что вполне допустимо. Следует также отметить, что значительные дифракционные возмущения отсутствуют, а форма распределения достаточно точно совпадает с результатами, полученными в ходе моделирования (ср.: рис. 2, кривая 4). Энергия генерируемого излучения достигает 800 мДж на длине волны $\lambda=1064$ нм и 500 мДж — для второй гармоники, частота следования импульсов $f=7$ Гц при средней мощности накачки $P_p=250$ Вт. Дифференциальный КПД лазера составил 2,2 %, а измеренная полная расходимость излучения лазера не превышала 0,6 мрад, что достаточно близко к дифракционному пределу.

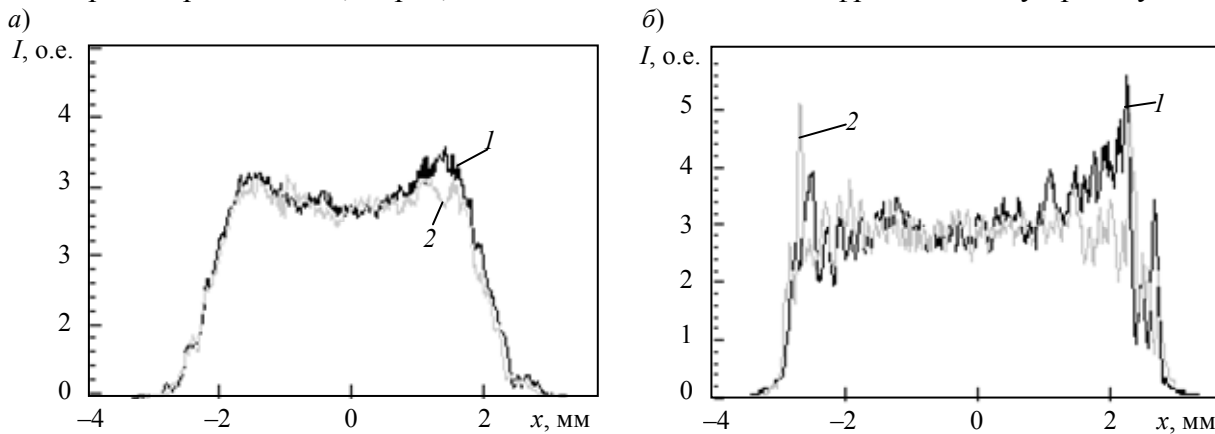


Рис. 3

Модуляция добротности осуществлялась электрооптическим затвором с временем включения менее 2 нс, при этом длительность импульса излучения не превышала 3—5 нс. Малое время включения затвора приводит к модуляции временной формы моноимпульса, что способствует дополнительному повышению пиковой мощности излучения относительно среднего уровня.

Существенно большее значение E_g может быть достигнуто, если увеличить радиальный коэффициент заполнения активной среды задающего генератора и усилителя. Для этого требуется изменить параметры выходного градиентного зеркала лазера: так, при $2w=4,5$ мм, $n=10$, $R_{\max}=22$ % была достигнута энергия выходного излучения 1100 мДж на длине волны 1064 нм. Неравномерность поперечного распределения интенсивности излучения составила ~18 % (рис. 3, б), длительность импульса излучения практически не изменилась, а угол расходимости излучения увеличился до 0,7 мрад. Данная модификация лазера может быть полезной при решении задач, где неравномерность пространственного распределения не играет столь существенной роли: например, в лидарных и дальнометрических комплексах.

Заключение. Разработанная компьютерная программа реализует математическую модель моноимпульсного лазера с неустойчивым резонатором, включающим градиентное зеркало. Использование полученных в результате компьютерной оптимизации параметров градиентного зеркала позволяет генерировать излучение с неоднородностью поперечного распределения, не превышающей 8 %, и энергией порядка 1 Дж. Результаты экспериментальных исследований пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения согласуются с результатами компьютерного моделирования. Параметры излучения разработанного

лазера удовлетворяют требованиям, необходимым для применения в технологических операциях получения наноматериалов, а малые габариты лазерного излучателя делают его привлекательным для использования и в других областях науки, техники, медицины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеева С. А., Бобринецкий И. И., Конов В. И., Неволин В. К., Подгаецкий В. М., Пономарева О. В., Савранский В. В., Селищев С. В., Симунин М. М. Исследование нанотрубчатых 3D-композитов, полученных под действием лазерного излучения // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 4. С. 337—341.
2. Choudhary S., Elsaie M. L., Leiva A., Nouri K. Lasers for tattoo removal: a review // Lasers Med. Sci. 2010. Vol. 25, N 5. P. 619—627.
3. Назаров В. В., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю. Мощный компактный Nd:YAG-лазер // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 11. С. 22—26.
4. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 264 с.
5. Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Назаров В. В., Приходько К. В., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю. Моделирование твердотельного лазера с диодной накачкой и параметрическим преобразователем частоты излучения // Оптич. журн. 2008. Т. 75, № 4. С. 28—34.
6. Звельто О. Принципы лазеров / Пер. с англ.; Под науч. ред. Т. А. Шмаонова. СПб: Изд-во „Лань“, 2008. 720 с.
7. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. N.Y.: Springer, 2006. 750 p.

Сведения об авторах

- Михаил Владимирович Иночкин** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: m_inochkin@mail.ru
- Вячеслав Валерьевич Назаров** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: lab255@grv.ifmo.ru
- Кирилл Александрович Федин** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: kirill_fedin@rambler.ru
- Леонид Викторович Хлопонин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: l_khloponin@yahoo.com
- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; заведующий кафедрой; E-mail: khramov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
26.04.13 г.